

⑯ BUNDESREPUBLIK

DEUTSCHLAND



DEUTSCHES

PATENT- UND
MARKENAMT

⑯ ⑯ **Offenlegungsschrift**
⑯ **DE 100 56 073 A 1**

⑯ Int. Cl. 7:

G 01 B 11/30

G 01 B 11/24

H 04 N 13/02

⑯ Aktenzeichen: 100 56 073.3
⑯ Anmeldetag: 8. 11. 2000
⑯ Offenlegungstag: 6. 6. 2002

⑯ Anmelder:

Tiziani, Hans, Prof. Dr.-Ing. habil., 71254 Ditzingen,
DE

⑯ Erfinder:

Windecker, Robert, Dr., 76275 Ettlingen, DE;
Fleischer, Matthias, 73760 Ostfildern, DE; Körner,
Klaus, Dr., 15566 Schöneiche, DE; Tiziani, Hans,
Prof. Dr., 71254 Ditzingen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑯ Optisches Verfahren und Sensor zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke

DE 100 56 073 A 1

Beschreibung

[0001] Für die Gewinnung der 3D-Punktwolke eines Objektes oder einer Szene auf der Grundlage der Triangulation wird in der Offenlegungsschrift DE 197 49 974 A1 ein Verfahren und Apparat beschrieben, bei welchem ein Objekt oder eine Szene mit strukturiertem Licht beleuchtet und eine Relativbewegung in z-Richtung zwischen dem Aufnahmesystem und dem zu vermessenden Körper bei der Aufnahme durchgeführt wird. Die Bewegung in z-Richtung kann dabei mit Mikrometergenauigkeit durchgeführt werden. Wie in der genannten Offenlegungsschrift dargestellt, ergibt sich bei dieser Relativbewegung in den Bildpunkten eines Bildempfängers ein Signal, welches in der Form einem Weißlichtinterferogramm sehr ähnlich ist. Deshalb wurde dort vorgeschlagen, die Auswertung zur Gewinnung der Punktwolke auf der Grundlage der bekannten Verfahren für Weißlicht- oder kurzkohärente Interferogramme auf der Basis der Phasen- und Kontrastauswertung oder der Wavelet-Verfahren durchzuführen.

[0002] Im Fall der Verwendung eines Stereo-Mikroskops, beispielsweise das Stereo-Mikroskop MZ12 der Firma Leica, in einem optischen Sensor zur Gewinnung der 3D-Punktwolke eines Objektes mittels Triangulation sind zwei getrennte Pupillenbereiche im Frontobjektiv vorhanden. Bei Zuordnung der ersten Pupille für die Beleuchtung eines Messobjekts mit strukturiertem Licht und der zweiten Pupille für die Beobachtung des Messobjekts ergibt sich bei einer Verschiebung des Stereo-Mikroskops zum Messobjekt, also in z-Richtung, während der Aufnahme in jedem Pixel eines Bildempfängers auch hierbei ein Signal, welches der Form eines Weißlichtinterferogrammes ähnlich ist. Beim Einsatz des Stereomikroskops MZ12 beträgt das Verhältnis zwischen dem Abstand der Pupillen und dem maximalen Pupillendurchmesser jedoch nur etwa 1 : 3. Für die Signalauswertung ergibt sich als Folge dessen ein moduliertes Signal mit einer Einhüllenden, jedoch mit nur mit ein bis zwei Perioden und in der Regel nur mit zwei signifikanten Signalmaxima. Ein Verkleinern der Blenden des Stereomikroskops würde zwar die Anzahl der Perioden unter der Einhüllenden auf mehr als zwei erhöhen, da sich beim Abblenden der Tiefenschärfebereich vergrößert. Jedoch erschwert das Abblenden die Anwendung des Stereomikroskops bei Tages- und Raumlicht und führt zu verrauschten Signalen besonders bei schwach reflektierenden Oberflächen. Die Auswertung von Signalen mit nur zwei Perioden wird bezüglich des Signal-Rausch-Verhältnisses und damit der erreichbaren Messgenauigkeit als wenig geeignet angesehen. In der Patentschrift US 5,381,236 wird eine Anordnung mit einem bewegten Objektiv oder einer in Strahlausbreitungsrichtung bewegten Linse beschrieben. Bei einem Stereomikroskop führt die Bewegung des Frontobjektivs bei einer Verschiebung in Strahlausbreitungsrichtung von beispielsweise 10 mm, die aus technischer Sicht bei der Bestimmung der Form und Mikroform von Messobjekten sehr vorteilhaft ist, jedoch zu einer nichtakzeptablen Änderung der Pupillenlage des Mikroskops in Bezug auf das Frontobjektiv, so dass sich die Abbildungsverhältnisse verändern. Beispielsweise ändert sich so der Bildort der Pupille und damit auch der Aperturwinkel. Dies ist besonders von Nachteil und sollte – bei einer in Relation zur Brennweite des Frontobjektivs nicht zu vernachlässigenden Verschiebung in Strahlausbreitungsrichtung – vermieden werden.

Beschreibung der Erfindung

[0003] Das Ziel der vorliegenden Erfindung besteht darin, Neues für die gewerbliche Anwendung bereitzustellen. Das

Ziel wird erreicht mit den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche.

[0004] Für ein Messobjekt wird die Bestimmung der Punktwolke mit großer Genauigkeit und in einem großen 5 Tiefenbereich auf der Grundlage der Triangulation durchgeführt. Bei der Messung soll das Mikroprofil, die Mikroform, die Welligkeit und die Form einer Oberfläche eines Messobjekts oder einer Mikro-Szene in Kombination oder auch einzeln erfasst werden können. Auch das Mikroprofil auf stark 10 geneigten oder sehr stark gekrümmten Oberflächen soll gemessen werden können. Dies erfolgt durch eine strukturierte Beleuchtung mit einem optischen Sensor mit möglichst großen Pupillen für die Beleuchtung und Beobachtung und vorzugsweise einem einzigen Frontobjektiv. Dabei sind die Pupillen für die Beleuchtung und Beobachtung jedoch vorzugsweise völlig getrennt. Es wird weiterhin vorgeschlagen, zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses, Signale mit einer Einhüllenden zu generieren, die in der Regel deutlich mehr als zwei Perioden unter der Einhüllenden aufweisen, wobei während der Signalgewinnung zwischen dem optischen Sensor und dem Messobjekt eine Relativbewegung zur Änderung des Abstandes zwischen dem optischen Sensor und dem Messobjekt durchgeführt wird. Zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke mit mindestens einer Lichtquelle, mit mindestens einem Beleuchtungssystem und mit mindestens einem Abbildungssystem mit jeweils je einer eigenen Pupillenfläche, mindestens einem Frontobjektiv, einem Messobjekt und mindestens einem durch die Lichtquelle beleuchteten Gitter wird ein optisches Verfahren vorgeschlagen, bei dem das Gitter, welches als ein Starrkörpergitter ausgebildet sein kann, der Lichtquelle nachgeordnet ist und durch das Beleuchtungssystem und das Frontobjektiv auf das Messobjekt abgebildet wird. Das strukturiert beleuchtete Messobjekt wird über das Frontobjektiv und das Abbildungssystem auf einen nachgeordneten Bildaufnehmer abgebildet. Um die Anzahl der Perioden unter der Einhüllenden zu erhöhen, wird erfahrungsgemäß im Messvorgang, also während der Aufnahme von Bildern, eine zumindestens quasi-kontinuierliche Bewegung des Transmissions-Liniengitter mittels eines rechnergesteuerten Schlittens durchgeführt, welcher vorzugsweise mit einem Schrittmotor ausgebildet ist. Die Bewegung des Starrkörpergitters erfolgt dabei so, dass sich in Signalverläufen in Bildpunkten des Bildempfängers die Anzahl der signifikanten Extrema im Signalverlauf in der Regel jeweils um mindestens eins gegenüber dem Fall der Nichtbewegung des Gitters erhöht. Die Anzahl der Extrema mit je einer Amplitude von mindestens 50% der maximalen Amplitude, soll dabei vorzugsweise mindestens drei betragen. Andererseits ist es aber auch möglich, wenn bei einem feststehenden Starrkörpergitter eine zu große Anzahl von Perioden unter der Einhüllenden auftritt, beispielsweise 10 Perioden, aufgrund eines im Verhältnis zum Pupillendurchmesser großen Pupillenabstandes, das Starrkörpergitter dann in entgegengesetzter 40 Richtung zu bewegen, so dass die Anzahl der Perioden von 10 auf beispielsweise 5 Perioden verringert wird.

[0005] Anstelle eines Starrkörpergitters kann aber auch ein elektronisch steuerbares Transmissionsgitter oder elektronisch steuerbares Reflexionsgitter angeordnet sein. Weiterhin kann auch ein elektronisch steuerbares, selbstleuchtendes Array, welches eine periodische LeuchtdichteVerteilung aufweisen kann, angeordnet sein. Erfahrungsgemäß wird zwischen dem Messobjekt und dem optischen Sensor eine Relativbewegung zumindestens mit einer Komponente 55 in Ausbreitungsrichtung des Schwerstrahls des Beobachtungsbündels für das Messobjekt durchgeführt und dabei mit dem Bildaufnehmer eine Serie von mindestens acht Bildern aufgenommen. Die Anzahl der Extrema mit je einer

Amplitude von mindestens 50% der Maximalamplitude in einem Signalverlauf in einem Bildpunkt des Bildempfängers soll dabei vorzugsweise mindestens drei betragen.

[0006] Gleichzeitig zur Aufnahme der Serie von Bildern wird bei Verwendung eines beleuchteten Starrkörpergitters eine vorbestimmte laterale Verschiebung mit einer Komponente zumindestens näherungsweise senkrecht zur optischen Achse des Beleuchtungssystems durchgeführt, so dass eine LeuchtdichteVerteilung verschoben wird, die mit der Relativbewegung synchronisiert ist, so dass in Bildpunkten des Bildaufnehmers aus mehreren Bildern jeweils ein periodischer Signalverlauf mit einem effektiven Modulationsmaximum und mit mindestens drei Extrema mit je einer Amplitude von mindestens 50% der Maximalamplitude erzeugt wird. Zur Bestimmung der Punktfolke des Messobjekts werden sowohl die Modulation als auch die Phase dieser Signalverläufe unter Berücksichtigung der vorbestimmten lateralen Verschiebung in jedem Bildpunkt des Bildaufnehmers ausgewertet. Es ist aber auch möglich, die LeuchtdichteVerteilung bei einem elektronischen Gitter vorzugsweise mittels einer elektronischen Steuerung zu verschieben.

[0007] Weiterhin wird erfindungsgemäß ein optisches Verfahren zur Gewinnung einer 3D-Punktfolke vorgeschlagen, bei dem sowohl die Relativbewegung als auch die vorbestimmte laterale Verschiebung der LeuchtdichteVerteilung zumindestens stückweise so erfolgt, dass der Quotient aus den beiden mittleren Geschwindigkeiten zumindestens näherungsweise bei der Aufnahme der Serie von Bildern zumindestens über eine Aufnahmezeit, die mindestens der Zeit von acht Bildzyklen entspricht, eine Konstante ist.

[0008] Weiterhin wird erfindungsgemäß ein optisches Verfahren zur Gewinnung einer 3D-Punktfolke vorgeschlagen, bei dem vorzugsweise sowohl die Geschwindigkeit der Relativbewegung als auch die vorbestimmte laterale Verschiebung der LeuchtdichteVerteilung über eine Aufnahmezeit, die mindestens der Zeit von acht Bildzyklen entspricht, zumindestens näherungsweise konstant gemacht ist. Weiterhin wird erfindungsgemäß ein optisches Verfahren zur Gewinnung einer 3D-Punktfolke vorgeschlagen, bei dem vorzugsweise aufgrund des Differenzwinkels zwischen Schwerpunktstrahl des Beobachtungsbündels des Messobjekts und der Richtung der Relativbewegung auftretende laterale Bildverschiebung auf dem Bildempfänger durch eine numerische Bildnachführung kompensiert wird.

[0009] Weiterhin wird erfindungsgemäß ein optisches Verfahren zur Gewinnung einer 3D-Punktfolke vorgeschlagen, bei dem vorzugsweise nach Beendigung der Relativbewegung und der Aufnahme einer Serie von Bildern die Richtung der Relativbewegung umgekehrt wird und mit dem Bildaufnehmer dabei mindestens eine weitere Serie von acht Bildern aufgenommen wird, wobei der auf die Oberfläche des Messobjekts gelangende Lichtstrom zumindestens auf die Hälfte des bei einer vorherigen Aufnahme einer Bildserie verwendeten reduziert wird.

[0010] Weiterhin wird erfindungsgemäß ein optisches Verfahren zur Gewinnung einer 3D-Punktfolke vorgeschlagen, bei dem vorzugsweise nach Beendigung der Relativbewegung die Richtung der Relativbewegung umgekehrt wird und mit dem Bildaufnehmer mindestens eine weitere Serie von acht Bildern aufgenommen wird, wobei der auf die Oberfläche des Messobjekts gelangende Lichtstrom zumindestens auf das Doppelte des bei einer vorherigen Aufnahme einer Bildserie verwendeten erhöht wird.

[0011] Weiterhin wird einem optischen Sensor zur Gewinnung einer 3D-Punktfolke mit mindestens einer Lichtquelle, mindestens einem Beleuchtungssystem und mindestens einem Abbildungssystem mit jeweils je einer eigenen

Pupillenfläche, einem Messobjekt, mindestens einem durch die Lichtquelle beleuchteten Gitter, welches durch das Beleuchtungssystem auf das Messobjekt abgebildet wird, und mit mindestens einem dem Abbildungssystem nachgeordneten Bildaufnehmer im Beleuchtungs- und Beobachtungsstrahlengang mindestens ein Frontobjektiv zugeordnet. Das Frontobjektiv ist vorzugsweise mit zwei getrennten Pupillenflächen ausgebildet, so dass die Pupillenzentren lateral separiert sind. Dabei ist dem beleuchteten Gitter vorzugsweise ein rechnersteuerbares Stellglied zugeordnet. Dabei kann das rechnersteuerbare Stellglied als rechnersteuerbarer Lineartisch ausgebildet sein.

[0012] Es ist auch möglich, dass das Stellglied als rechnersteuerbarer Drehtisch ausgebildet ist. In diesem Fall ist das beleuchtete Gitter vorzugsweise als Spiral-Gitter ausgebildet und dem Drehtisch zugeordnet. So kann bei Drehung des Spiral-Gitters von jedem Punkt der Oberfläche des Messobjekts ein kontinuierliches, periodisches Signal mit einer Modulation und mit mindestens drei Extrema mit je einer Amplitude von mindestens 50% der Maximalamplitude erzeugt werden. Die in Abhängigkeit vom Drehpunkt des Drehtisches sich ergebende Phasenveränderung kann vorbestimmt sein und wird bei der Signalauswertung als bekannte Größe berücksichtigt. Vorteilhafterweise beträgt der Durchmesser der Spirale dabei mindestens das Dreifache der Diagonale des Bildempfängers.

[0013] Weiterhin wird einem optischen Sensor zur Gewinnung einer 3D-Punktfolke mit mindestens einer Lichtquelle, mindestens einem Beleuchtungssystem und mindestens einem Abbildungssystem mit jeweils je einer eigenen Pupillenfläche, einem Messobjekt, mindestens einem selbstleuchtenden, elektronisch steuerbaren Array, welches durch das Beleuchtungssystem auf das Messobjekt abgebildet wird, und mindestens einem dem Abbildungssystem nachgeordneten Bildaufnehmer im Beleuchtungs- und Beobachtungsstrahlengang ein gemeinsames Frontobjektiv zugeordnet, welches jedoch mit zwei getrennten Pupillenflächen ausgebildet ist so dass die Pupillenzentren lateral separiert sind. Weiterhin wird bei einem optischen Sensor zur Gewinnung einer 3D-Punktfolke eine laterale Separierung der Pupillenzentren vorzugsweise so ausgeführt, dass die beiden Pupillenzentren so angeordnet sind, dass deren Abstand mindestens der halben maximalen Ausdehnung der größten Pupillenfläche auf der Verbindungsgerade der beiden Pupillenzentren entspricht.

[0014] Weiterhin wird einem optischen Sensor zur Gewinnung einer 3D-Punktfolke der optische Sensor vorzugsweise als Stereo-Mikroskop ausgebildet. Dabei kann mit Vorteil einer der beiden optischen Kanäle für die Beleuchtung und einer der beiden Kanäle für die Abbildung des Messobjekts verwendet werden.

[0015] Weiterhin kann auch dem Messobjekt ein rechnersteuerbarer Präzisions-z-Lineartisch zugeordnet sein und die Relativbewegung zwischen dem Sensor und dem Messobjekt allein durch die Bewegung des Messobjekts auf dem rechnersteuerbaren Präzisions-z-Lineartisch realisiert sein.

[0016] Weiterhin ist es vorzugsweise möglich, dass ein steuerbares Mikro-Luminiszenzdioden-Array oder ein steuerbares Mikro-Laser-Array eingesetzt wird, um eine laterale Verschiebung der LeuchtdichteVerteilung zu ermöglichen.

[0017] Weiterhin ist im Beleuchtungs- und Beobachtungssystem des Stereomikroskops vorzugsweise je ein Zoom-System angeordnet, wobei der Zoomfaktor jeweils gleich ist. Der erfasste Ausschnitt auf dem Messobjekt als auch die z-Auflösung des Sensors kann durch die vom Zoomfaktor abhängige Streifenbreite gezielt ausgesucht werden. So ist es möglich, zunächst eine Übersichtsmessung am Messobjekt durchzuführen und anschließend besonders interessante

rende Details, z. B. Defekte, zu vermessen.

[0018] Die Auswertung der modulierten Signale kann wie folgt erfolgen: Die pixelweise Auswertung ermittelt für jeden Objektpunkt das Maximum des Streifenkontrastes aus dem Betrag der Differenz von je zwei aufeinanderfolgenden Kamerabildern. Die Kameradaten kurz vor und nach dem Durchlaufen des Maximums werden in einem zyklischen Buffer abgelegt, wobei die Zeitdifferenz zwischen den ersten abzulegenden Daten und dem Durchlaufen des Maximums durch eine Verzögerungsleitung ausgeglichen wird, die ebenfalls über einen zyklischen Buffer realisiert ist. Die abgelegten Daten werden pixelweise mittels Lock-in-Detektion in die beiden Quadraturkomponenten zerlegt und Amplitude und Phase getrennt ermittelt. Der Schwerpunkt des Amplitudenquadrats des Signals abzüglich eines 50% Schwellwertes liefert die eine Signalkomponente, die Phase des Trägers im Schwerpunkt die andere. Aus den beiden Teilkomponenten ergibt sich über die Geometrie des Strahlengangs die phasenkorrekte 3D-Punktwolke des Messobjektes.

[0019] Es ist aber bei der Durchführung von schnellen Überblicksmessungen auch möglich, dass aus dem in einem Bildpunkt des Bildempfängers gewonnenen periodischen Signalverlauf mit einer Einhüllenden nur der Ort des Kontrastmaximums, also die z-Position für den jeweils zugehörigen Objektpunkt, bestimmt wird und ausgehend von diesen Daten und der Kenntnis der Geometrie des optischen Sensors die 3D-Punktwolke des Messobjekts bestimmt wird.

Patentansprüche

1. Optisches Verfahren zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke mit mindestens einer Lichtquelle (1), mindestens einem Beleuchtungssystem (3), einem Frontobjektiv (4) und mindestens einem Abbildungssystem (7), wobei das Beleuchtungssystem (3) und das Abbildungssystem (7) jeweils eine eigene Pupillenfläche aufweisen, einem Messobjekt (5), mindestens einem durch die Lichtquelle (1) beleuchteten Gitter (2), welches durch das Beleuchtungssystem (3) und das Frontobjektiv (4) auf das Messobjekt (5) abgebildet wird, und mindestens einem dem Abbildungssystem (7) nachgeordneten Bildaufnehmer und zwischen dem Messobjekt (5) und dem optischen Sensor eine Relativbewegung zumindestens mit einer Komponente in Ausbreitungsrichtung des Schwerstrahls des Beobachtungsbündels für das Messobjekt (5) erfolgt und dabei mit dem Bildaufnehmer eine Serie von Bildern aufgenommen wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass gleichzeitig zur Aufnahme der Serie von Bildern für das beleuchtete Gitter (2) eine vorbestimmte laterale Verschiebung mit einer Komponente zumindestens näherungsweise senkrecht zur optischen Achse des Beleuchtungssystems (3) erfolgt, so dass eine Leuchtdichteverteilung verschoben wird, die mit der Relativbewegung synchronisiert ist, so dass in Bildpunkten des Bildaufnehmers aus mehreren Bildern jeweils ein Signalverlauf mit einem effektiven Modulationsmaximum und mit mindestens drei Extrema erzeugt wird, so dass sich die Anzahl der Extrema mit je einer Amplitude von mindestens 50% der Maximalamplitude in einem Signalverlauf in einem Bildpunkt des Bildempfängers um mindestens eins gegenüber dem Fall der Nichtbewegung des Gitters (2) erhöht und zur Bestimmung der Punktwolke des Messobjekts (5) sowohl die Modulation als auch die Phase dieses Signalverlaufs unter Berücksichtigung der vorbestimmten lateralen

Verschiebung in jedem Bildpunkt des Bildaufnehmers ausgewertet werden.

2. Optisches Verfahren zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke mit einer Lichtquelle (1), einem Beleuchtungssystem (3) und einem Abbildungssystem (7) mit je einer eigenen Pupillenfläche, einem Frontobjektiv (4), einem Messobjekt (5), einem durch die Lichtquelle (1) beleuchteten, elektronisch steuerbaren Transmissionsgitter, welches eine periodische Transparenz aufweist, welches durch das Beleuchtungssystem (3) und das Frontobjektiv (4) auf das Messobjekt (5) abgebildet wird, und einem dem Abbildungssystem (7) nachgeordneten Bildaufnehmer und zwischen dem Messobjekt (5) und dem optischen Sensor eine Relativbewegung zumindestens mit einer Komponente in Ausbreitungsrichtung des Schwerstrahls des Beobachtungsbündels für das Messobjekt (5) erfolgt und dabei mit dem Bildaufnehmer eine Serie von Bildern aufgenommen wird, dadurch gekennzeichnet, dass gleichzeitig zur Aufnahme der Serie von Bildern die Transmissionsminima und -maxima des beleuchteten, elektronisch steuerbaren Transmissionsgitters elektronisch gesteuert eine vorbestimmte laterale Verschiebung mit einer Komponente zumindestens näherungsweise senkrecht zur optischen Achse des Beleuchtungssystems (3) erfahren, so dass eine Leuchtdichteverteilung verschoben wird, die mit der Relativbewegung synchronisiert ist, so dass in Bildpunkten des Bildaufnehmers aus mehreren Bildern jeweils ein Signalverlauf mit einem effektiven Modulationsmaximum und mit mindestens drei Extrema mit je einer Amplitude von mindestens 50% der Maximalamplitude erzeugt wird, und zur Bestimmung der Punktwolke des Messobjekts (5) sowohl die Modulation als auch die Phase dieses Signalverlaufs unter Berücksichtigung der vorbestimmten lateralen Verschiebung in jedem Bildpunkt des Bildaufnehmers ausgewertet werden.

3. Optisches Verfahren zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke mit einer Lichtquelle (1), einem Beleuchtungssystem (3) und einem Abbildungssystem (7) mit je einer eigenen Pupillenfläche, einem Frontobjektiv (4) einem Messobjekt (5), einem durch die Lichtquelle (1) beleuchteten, elektronisch steuerbaren Reflexionsgitter, welches eine periodische Transparenz aufweist, welches durch das Beleuchtungssystem (3) und das Frontobjektiv (4) auf das Messobjekt (5) abgebildet wird, und einem dem Abbildungssystem (7) nachgeordneten Bildaufnehmer und zwischen dem Messobjekt (5) und dem optischen Sensor eine Relativbewegung zumindestens mit einer Komponente in Ausbreitungsrichtung des Schwerstrahls des Beobachtungsbündels für das Messobjekt (5) erfolgt und dabei mit dem Bildaufnehmer eine Serie von Bildern aufgenommen wird, dadurch gekennzeichnet, dass gleichzeitig zur Aufnahme der Serie von Bildern die Transmissionsminima und -maxima des beleuchteten, elektronisch steuerbaren Transmissionsgitters elektronisch gesteuert eine vorbestimmte laterale Verschiebung mit einer Komponente zumindestens näherungsweise senkrecht zur optischen Achse des Beleuchtungssystems (3) erfahren, so dass eine Leuchtdichteverteilung verschoben wird, die mit der Relativbewegung synchronisiert ist, so dass in Bildpunkten des Bildaufnehmers aus mehreren Bildern jeweils ein Signalverlauf mit einem effektiven Modulationsmaximum und mit mindestens drei Extrema mit je einer Amplitude von mindestens 50% der Maximalamplitude erzeugt wird, und zur Bestimmung der Punktwolke des Messobjekts

(5) sowohl die Modulation als auch die Phase dieses Signalverlaufs, unter Berücksichtigung der vorbestimmten lateralen Verschiebung in jedem Bildpunkt des Bildaufnehmers ausgewertet werden.

4. Optisches Verfahren zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke mit einem Beleuchtungs- und Abbildungssystem mit je einer eigenen Pupillenfläche, einem Messobjekt (5), einem selbstleuchtenden, elektronisch steuerbaren Array, welches eine periodische Leuchtdichtevertteilung aufweist, welches durch das Beleuchtungssystem auf das Messobjekt (5) abgebildet wird, und einem dem Abbildungssystem (7) nachgeordneten Bildaufnehmer und zwischen dem Messobjekt (5) und dem optischen Sensor, einschließlich einer Baugruppe desselben, eine Relativbewegung zumindestens mit einer Komponente in Ausbreitungsrichtung des Schwerstrahls des Beobachtungsbündels für das Messobjekt (5) erfolgt und dabei mit dem Bildaufnehmer eine Serie von Bildern aufgenommen wird, dadurch gekennzeichnet, dass gleichzeitig zur Aufnahme der Serie von Bildern die Leuchtdichteminima und -maxima des selbstleuchtenden, elektronisch steuerbaren Transmissionsgitters elektronisch gesteuert eine vorbestimmte laterale Verschiebung mit einer Komponenten zumindestens näherungsweise senkrecht zur optischen Achse des Beleuchtungssystems (3) erfahren, so dass eine Leuchtdichtevertteilung verschoben wird, die mit der Relativbewegung synchronisiert ist, so dass in Bildpunkten des Bildaufnehmers aus mehreren Bildern jeweils ein Signalverlauf mit einem effektiven Modulationsmaximum und mit mindestens drei Extrema mit je einer Amplitude von mindestens 50% der Maximalamplitude erzeugt wird, und zur Bestimmung der Punktwolke des Messobjekts (5) sowohl die Modulation als auch die Phase dieses Signalverlaufs unter Berücksichtigung der vorbestimmten lateralen Verschiebung ausgewertet werden.

5. Optisches Verfahren zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke nach mindestens einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass sowohl die Relativbewegung als auch die vorbestimmte laterale Verschiebung der Leuchtdichtevertteilung zumindestens stückweise so erfolgt, dass der Quotient aus den beiden mittleren Geschwindigkeiten zumindestens näherungsweise bei der Aufnahme der Serie von Bildern zumindestens über eine Aufnahmezeit, die mindestens der Zeit von acht Bildzyklen entspricht, eine Konstante ist.

6. Optisches Verfahren zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass sowohl die Geschwindigkeit der Relativbewegung als auch die vorbestimmte laterale Verschiebung der Leuchtdichtevertteilung bezogen auf die Aufnahmezeit, die mindestens der Zeit von acht Bildzyklen entspricht, zumindestens näherungsweise konstant gemacht ist.

7. Optisches Verfahren zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke nach mindestens einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die aufgrund des Differenzwinkels zwischen Schwerpunktstrahl des Beobachtungsbündels des Messobjekts (5) und der Richtung der Relativbewegung auftretende laterale Bildverschiebung auf dem Bildempfänger durch eine numerische Bildnachführung kompensiert wird.

8. Optisches Verfahren zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke nach mindestens einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass nach Beendigung der Relativbewegung und der Aufnahme einer

Serie von Bildern die Richtung der Relativbewegung umgekehrt wird und mit dem Bildaufnehmer dabei mindestens eine weitere Serie von Bildern aufgenommen wird, wobei der auf die Oberfläche des Messobjekts gelangende Lichtstrom zumindestens auf die Hälfte des bei einer vorherigen Aufnahme einer Bildserie verwendeten reduziert wird.

9. Optisches Verfahren zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke nach mindestens einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass nach Beendigung der Relativbewegung die Richtung der Relativbewegung umgekehrt wird und mit dem Bildaufnehmer mindestens eine weitere Serie von Bildern aufgenommen wird, wobei der auf die Oberfläche des Messobjekts (5) gelangende Lichtstrom zumindestens auf das Doppelte des bei einer vorherigen Aufnahme einer Bildserie verwendeten erhöht wird.

10. Optischer Sensor zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke mit mindestens einer Lichtquelle (1), mindestens einem Beleuchtungssystem (3) und mindestens einem Abbildungssystem (7) mit jeweils je einer eigenen Pupillenfläche, einem Messobjekt (5), mindestens einem durch die Lichtquelle (1) beleuchteten Gitter (2), welches durch das Beleuchtungssystem (3) auf das Messobjekt (5) abgebildet wird, und mindestens einem dem Abbildungssystem (7) nachgeordneten Bildaufnehmer, dadurch gekennzeichnet, dass dem Beleuchtungssystem (3) und dem Aufnahmesystem (7) ein gemeinsames Frontobjektiv (4) zugeordnet ist, welches jedoch mit zwei getrennten Pupillenflächen ausgebildet ist, so dass die Pupillenzentren lateral separiert sind und dem optischen Sensor ein rechnergesteuerter Präzisions-z-Lineartisch (6) zugeordnet ist, wobei dem beleuchteten Gitter (2) ein rechnersteuerbares Stellglied zugeordnet ist.

11. Optischer Sensor zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass das Stellglied als rechnersteuerbarer Lineartisch ausgebildet ist.

12. Optischer Sensor zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass das Stellglied als rechnersteuerbarer Drehtisch ausgebildet ist.

13. Optischer Sensor zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass das beleuchtete Gitter (2) als Spiral-Gitter ausgebildet und dem Drehtisch zugeordnet ist.

14. Optischer Sensor zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke mit mindestens einer Lichtquelle (1), mindestens einem Beleuchtungssystem (3) und mindestens einem Abbildungssystem (7) mit jeweils je einer eigenen Pupillenfläche, einem Messobjekt (5), mindestens einem selbstleuchtenden, elektronisch steuerbaren Array, welches durch das Beleuchtungssystem (3) auf das Messobjekt (5) abgebildet wird, und mindestens einem dem Abbildungssystem (7) nachgeordneten Bildaufnehmer, dadurch gekennzeichnet, dass dem Beleuchtungssystem (3) und dem Beobachtungssystem (7) ein gemeinsames Frontobjektiv (4) zugeordnet ist, welches jedoch mit zwei getrennten Pupillenflächen ausgebildet ist, so dass die Pupillenzentren lateral separiert sind und dem optischen Sensor ein rechnergesteuerte Präzisions-z-Lineartisch (6) zugeordnet ist.

15. Optischer Sensor zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke nach Anspruch 13 oder 14, dadurch gekennzeichnet, dass die laterale Separierung der Pupillenzentren mindestens der halben maximalen Ausdehnung so ausgeführt ist, dass die beiden Pupillenzentren so ange-

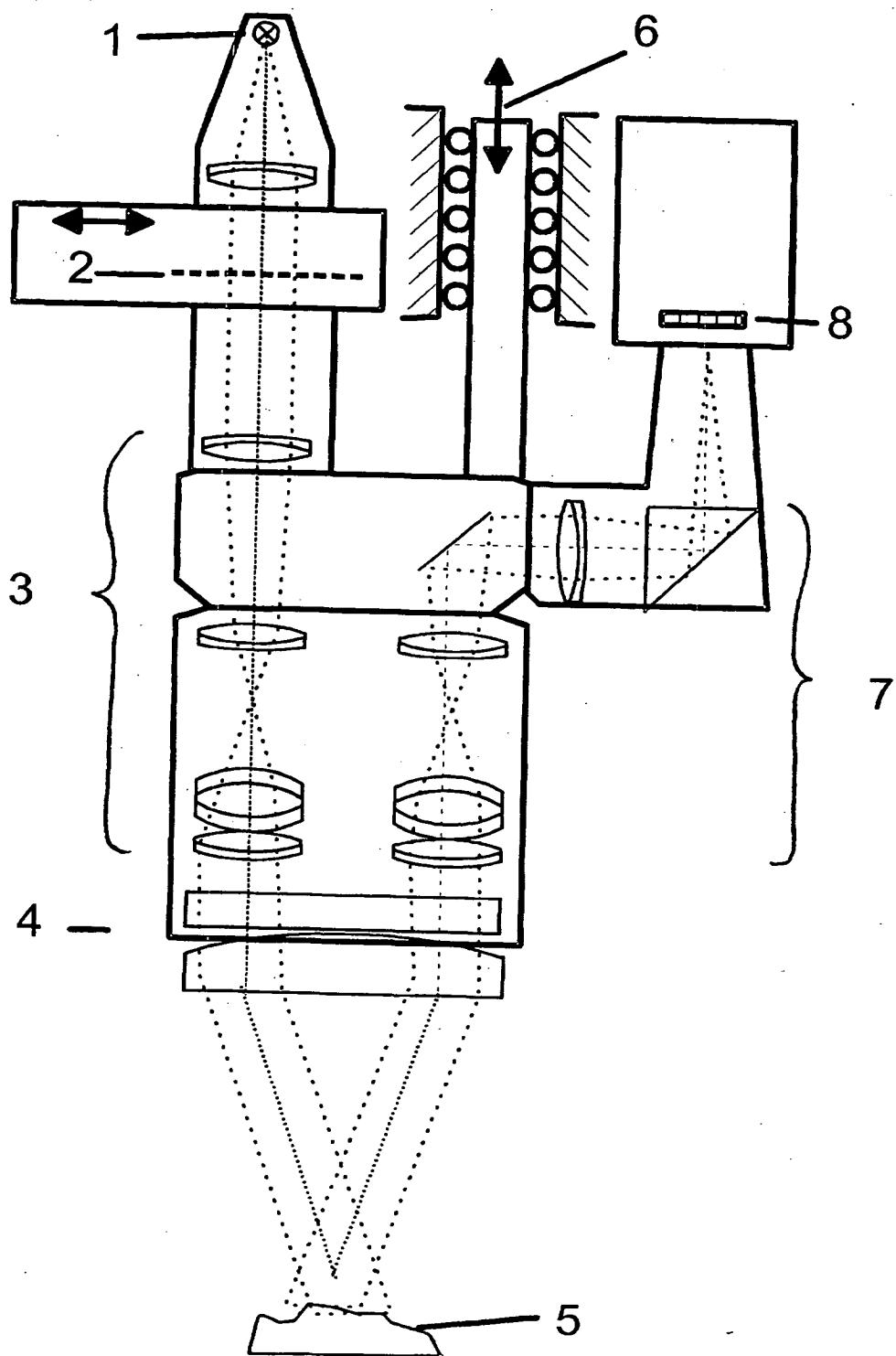
ordnet sind, dass deren Abstand mindestens der halben maximalen Ausdehnung der größten Pupillenfläche auf der Verbindungsgerade der beide Pupillenzentren entspricht.

16. Optischer Sensor zur Gewinnung einer 3D-Punktwolke nach mindestens einem der vorherigen Ansprüche 13 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Sensor als Stereo-Mikroskop ausgebildet ist. Die Erfindung wird im folgenden nur beispielhaft unter Bezugnahme auf die Figur beschrieben. Die Figur zeigt 5 ein Stereo-Mikroskop MZ12 der Firma Leica mit einer Lichtquelle 1, welches ein Transmissions-Liniengitter 2 beleuchtet. Dieses Transmissionsgitter 2 wird über das Beleuchtungssystem 3, welches ein Zoom-System enthält, und das Frontobjektiv 4 auf das Messobjekt 5 10 abgebildet. In Abhängigkeit von der Relativlage des Messobjekts 5 zum Stereomikroskop entsteht ein mehr oder weniger scharfes Bild des Transmissionsgitters 2 auf dem Messobjekt 5. Durch die mechanische Verbindung des Stereomikroskops mit einem rechnergesteuerten Präzisions-z-Lineartisch 6 wird im Messvorgang eine kontinuierliche Relativbewegung zwischen dem Stereomikroskop und dem Messobjekt 5 15 durchgeführt. Dabei wird das Messobjekt 5 über einen vom Beleuchtungsstrahlengang verschiedenen Bereich 20 des Frontobjektivs 4 abgebildet. Über das Abbildungssystem 7, welches ebenfalls ein Zoom-System mit dem jeweils gleichen Zoom-Faktor wie das Beleuchtungssystem 3 beinhaltet, erfolgt die Abbildung des Messobjekts 5 auf einen Bildaufnehmer, der hier als CCD-Kamera 8 25 ausgebildet ist, mit einem hier nicht dargestellten Frame-Grabber und Rechner. Der optische Abgleich des Stereomikroskops ist so durchgeführt, dass im Objektraum die optisch konjugierte Ebene des Transmissionsgitters 2 und die der CCD-Kamera 8 permanent 30 zusammenfallen. Der Messvorgang startet in einer Position des Stereomikroskops, in welcher sich alle Objektpunkte des zu vermessenden Messobjekts 5, beispielsweise ein Keramikbauteil, oberhalb oder unterhalb der optisch konjugierten Ebene des Transmissionsgitters 2 und der CCD-Kamera 8 im Objektraum, also der gemeinsamen Schärfeebebe im Objektraum, befinden. Durch eine rechnergesteuerte Bewegung des Stereomikroskops in Richtung des Messobjekts 5 werden nach und nach die Objektpunkte des 35 Messobjekts 5 von der Schärfeebebe erfasst. Im Bewegungsvorgang werden dabei von der CCD-Kamera 8 so lange kontinuierlich Bilder aufgenommen bis alle interessierenden Objektpunkte des Messobjekts 5 zumindest einmal scharf aufgenommen sind. Der Aufnahmevergäng wird beendet, wenn auch der letzte interessierende Objektpunkt des Messobjekts 5 bereits wieder unscharf geworden ist. Gleichzeitig zur Bewegung des Stereomikroskop in Richtung des Messobjekts 5 erfolgt eine kontinuierliche Bewegung des Transmissionsgitters 2 mittels eines hier nicht dargestellten rechnergesteuerten Schlittens mit einem Schrittmotor. So wird zu der sich aus der Separierung der Pupillen von Beleuchtung und Beobachtung ergebenden lateralen Verschiebung der Streifen auf dem Messobjekt eine 40 zusätzliche laterale Verschiebung der Streifen erzeugt. Diese ist so gewählt, dass sich die Anzahl der Extrema mit je einer Amplitude von mindestens 50% der Maximalamplitude in einem Signalverlauf in einem Bildpunkt des Bildempfängers um mindestens eins gegenüber dem Fall der Nichtbewegung des Gitters erhöht. Die Anzahl der Extrema mit je einer Amplitude von 45 mindestens 50% der Maximalamplitude soll dabei

mindestens drei betragen. Üblicherweise wird mit etwa fünf Amplituden von mindestens 50% der Maximalamplitude gearbeitet. Dazu werden in einem Stereomikroskop unter Verwendung eines Planapochromaten 1x als Frontobjektiv, eines Transmissions-Liniengitter 2 mit einer Gitterkonstante von 178 µm, bei einem Zoom-Faktor im Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlengang von 1,25x, einem Abstand der Pupillenzentren von 24 mm, einem Pupillendurchmesser von etwa 8 mm und einer Verschiebung des Stereomikroskops von 25 mm parallel zur optischen Achse des Frontobjektivs bis zu 512 Bilder aufgenommen. Dabei erfolgt die Signalverarbeitung nach folgendem Ansatz: Zum Ausgleich des Differenzwinkels zwischen Hauptstrahl des Beobachtungsbündels und der Richtung der Relativbewegung und der damit verbundenen Verschiebung des Objektbildes auf der CCD-Kamera werden die Kamerabilder im Rechner zurückgeschoben. Die pixelweise Signal-Auswertung liefert für jeden Objektpunkt das Maximum des Streifenkontrastes aus dem Betrag der Differenz von je zwei aufeinanderfolgenden Kamerabildern. Die Kameradaten kurz vor und nach dem Durchlaufen des Maximums werden in einem zyklischen Buffer abgelegt, wobei die Zeitdifferenz zwischen den ersten abzulegenden Daten und dem Durchlaufen des Maximums durch eine Verzögerungsleitung ausgeglichen wird, die ebenfalls über einen zyklischen Buffer realisiert ist. Die abgelegten Daten werden pixelweise mittels Lock-in-Detektion in die beiden Quadraturkomponenten zerlegt, wobei Amplitude und Phase getrennt ermittelt werden. Der Schwerpunkt des Amplitudenquadrats des Signals abzüglich eines 50% Schwellwertes liefert die eine Signalkomponente, die Phase des Trägers im Schwerpunkt dann die andere. Aus den beiden Teilkomponenten ergibt sich über die Geometrie des Strahlengangs die phasenkorrekte 3D-Punktwolke des Messobjekts S.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -



Figur